



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

不对称街谷内PM_{2.5}浓度垂直分布特征及成因

陈凡涛, 赵文吉, 晏 星, 等. 2016, 10(3): 1333-1339



中国科学院
生态环境研究中心

主办



科学出版社

出版

Vol. 10 No. 3

2016.3

目次

水污染防治

组合式垂直流人工湿地工艺及其污水处理效果	唐孟煊 吴娟 代嫣然 李柱 崔娜欣 钟非 成水平(1017)
生活污水中肠道病毒分布特性的定量PCR研究	周进宏 王晓昌 张崇森 徐丽梅(1023)
质量平衡模型及其在污水处理厂节能降耗中的应用	张晓军 应启峰 王洪臣 尹训飞 蒋松竹 张源凯 何志江 范强(1030)
改进型A/O生物膜工艺在油田污水达标外排中的应用	张敏 宋昭峥 孙珊珊 张志勇 穆红岩 李永峰 张忠智(1035)
磁场与微生物固定技术处理酸性镀铜废水	靳小蓓 巢云龙 李宏君 刘言 董慧 李宁 隋海然 林山杉(1041)
高铁酸钾法去除水中1,1-DCE	李亚龙 金铁杰 杨琦 秦思(1048)
气水比对污泥水中以鸟粪石形式回收氮磷的影响	豆艳霞 王怡 黄瑞雪 杜红霞 王社平 南亚萍(1053)
简青霉-生物炭联合吸附处理染料废水	简浩 徐卫华 刘云国 曾光明 李欣(1059)
不同乙酸钠浓度对UASB中颗粒污泥形成的影响	马海玲 郑明月 龚淑芬 王凯军 李凌燕 东秀珠(1065)
中试规模IC反应器处理大豆蛋白废水的颗粒污泥培养和启动	鹿时雨 高宝玉 亓秋波 王燕 岳钦艳(1070)
阳极石墨毡酸处理对微生物燃料电池型BOD传感器性能的影响	海冰寒 张盼月 王靖怡 吕晓雪 徐自明(1075)
催化强化臭氧氧化处理化工园区生化尾水	周洁 徐军 涂勇 刘伟京 赵贤广 张耀辉(1081)
复合金属氧化物的制备及其光催化性能	李贞玉 刘美玲 商希礼 李长海(1087)
A/O-MBR中硝化活性污泥的富集及其对氧氨沙星的降解作用	谢攀科 陈东辉 黄满红 郑伟 郑宇(1092)
超声对磷酸铵镁结晶特性的影响	刘立志 邱立平 王嘉斌 张守彬 谢康(1097)
玉米芯为碳源铁屑协同生物炭麦饭石活化颗粒的硫酸盐还原动力学及其锰离子响应实验	狄军贞 安文博 戴男男 朱志涛 江富 任亚东 赵前程(1103)
不同炭材料吸附Cr(VI)的热力学研究	单鑫 陈荟蓉 禹洪丽 韩彩芸 朱文杰 李曦同 罗永明(1109)
聚硅铝三十(PASC ₃₀)的制备及混凝效果	李诚成 赵远 叶长青(1116)
天然有机物对PVDF超滤膜的污染行为及AFM表征	王磊 张静怡 王旭东 王志盈 苗瑞 黄丹曦(1121)
膨胀石墨对U(VI)的吸附特性	胡珂琛 谢水波 刘迎九 凌辉 史冬峰(1126)
藻类膜对磷的吸附/吸收行为研究	周军 魏群 李晓伟 陈延飞 涂晓杰(1133)
PS高级氧化-离子沉淀-V型砂滤组合工艺深度处理AO7染料废水应用研究	万金泉 濮梦婕 马邕文 王艳 韩东晖 李欢旋(1138)
针铁矿-腐殖酸的复合物对泰乐菌素的吸附	张晶 郭学涛 葛建华 宋晓梅 杨琛 党志 彭丹(1145)
聚乙烯亚胺/Fe ₃ O ₄ 杂化磁性纳米吸附剂去除甲基橙	刘旸 赵雪松 潘学军 陈波(1152)
AB-ASBR工艺处理高浓度有机废水的优化运行	王慧礼 李晋 李啸松 岳秀萍 端木允(1159)
流量分配比对改良型多级A/O工艺去除污染物的影响	张国珍 高小波 武福平 杨光 马可(1165)
组合骨料型百喜草植生混凝土去除氮磷	严雄凤 刘迎云 姚清伟 黄大伟(1171)
喹诺酮抗性基因在城市污水处理系统中的分布及去除	李超 鲁建江 童延斌 刘江 李超道 郑晓伍(1177)
紫外光引发模板聚合阳离子聚丙烯酰胺及其表征	郑怀礼 郑晓楷 冯力 朱传俊 寿倩影 关庆庆 孙永军 廖勇(1184)
阳宗海沉积物中重金属生物有效性评估	杨常亮 陈桂明 李世玉 冯文波 邵欢瑜 刘仍兵 刘楷 刘彬 王艳丹(1191)
城镇污水处理厂污泥中磷的形态分布及生物可利用性分析	沈雪莲 周振 任伟超 蒋玲燕 魏海娟 李云辉 胡大龙 乔卫敏(1200)
膜探针的制备及PVA/PEG/PVP在膜污染过程中的作用	崔石磊 王磊 黄丹曦 王旭东 孟晓荣 吕永涛(1205)
微生物燃料电池藻阴性能比较及膜污染分析	郑伟 唐超 黄满红 陈东辉 陈亮 孙哲 林俊(1211)
响应面法分析Fenton氧化处理采油废水的过程	朱米家 田伟 刘瑞平 原志敬 姚俊(1217)
厌氧氨氧化颗粒污泥的快速培养与形成机理	刘晓宇 王思慧 薛耀琦 郭延凯 康静 郭建博(1223)
臭氧氧化对二级出水有机物(EfOM)特性机制的影响	刘建红 王利颖 王保贵 刘红 郭瑾(1228)
改性硅酸钙对养殖废水厌氧除磷过程中污泥特性的影响	田延威 糜洵 严群(1235)
膜萃取技术回收浓缩废水中的邻甲苯胺	王天培 马宏瑞 花莉 王宇彤(1241)
低分子有机酸对染料废水电催化氧化的影响	李萌 马宏瑞 张乾隆 王景平 花莉(1247)
混凝与芬顿工艺联用处理切削废液	黄腾蛟 汪清环 孙启元 郑育毅 刘文伟(1253)
微生物电解池从剩余污泥热碱水解液中回收鸟粪石	梁永静 郝皓 骆海萍 刘广立 张仁铎(1259)
硫化亚铁纳米粒子吸附地下水中的镉	李佳 霍丽娟 钱天伟(1264)
多孔水力空化装置降解甲基橙	师淑婷 晋日亚 杨思静 孔维甸 王永杰 李志通 郑伟民(1271)
Fe ²⁺ 活化过硫酸钠原位修复氯苯污染地下水	王继鹏 虞敏达 蔡小波 杨彦 李定龙(1276)
煤质炭制备条件的优化及对酚类吸附性能与吸附动力学	玛依拉·麦麦提热依木 迪丽努尔·塔力甫 阿布力克木·阿布力孜(1281)

热氧化法制备 Ti/RuO ₂ -TiO ₂ -IrO ₂ 电极及处理亚甲基蓝废水	魏 婕	黄 胜	宋鹏程	罗 洁(1289)
O ₃ -BAC 工艺臭氧优化和有机物分子质量分布研究	杨叶琴	张 冬	吕锡武	(1295)
硝酸盐反硝化颗粒污泥的快速培养与理化特性	刘 晓 宇	郭 延 凯	马 志 远	薛 耀 琦
.....	张 晨 晓	段 莉 丽	李 敏	郭 建 博(1300)
旋转盘反应器光催化降解苯酚废水动力学	魏 冰	张 巧 玲	刘 有 智	李 磊
酸化-复合絮凝法预处理煤化工废水	冯 一 伟	柴 涛(1310)	王 美 华	吴 李 花
基于超滤膜技术的 DMF 废液预处理	魏 秀 珍	林 春 绵(1317)	商 丹 红	邴 昱 丞
改性二氧化钛纳米管对水体中磷的吸附	张 志 生(1322)	刘 二 博	赵 兵 强	张 明 亮
化学沉淀法脱除 HPF 脱硫废液中的硫氰酸盐	赵 炜(1328)			

大 气 污 染 防 治

不对称街谷内 PM _{2.5} 浓度垂直分布特征及成因	陈凡涛	赵文吉	晏 星	熊秋林(1333)
2011—2013 年中国雾霾易发生期间 API 的分布格局	潘竟虎	张 文	王春娟(1340)	
长江三角洲 PM ₁₀ 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉	江 洪	肖钟湧(1349)	
西安市城区持久性有机污染物的干湿沉降	袁宏林	范雅文	王晓昌(1358)	
基于 Fluent 城市大气污染物扩散数值模拟	杨志斌	袁德奎(1365)	黄文伟	万 霞
基于 SCR 系统的公交车颗粒物排放特性的道路实验研究	张 强	孙龙林(1370)	白兆圆	杨雪晶
Fenton 试剂氧化吸收脱除气相中 Hg ⁰ 的工艺过程及传质动力学	李剑平	马 良	杨 强	白志山
.....	隋志军	汪华林(1375)		

固 体 废 弃 物 处 理 与 处 置

烧结电除尘灰浸出液氯化钾转化法制备硫酸钾	裴 滨	詹 光	郭占成	高金涛(1382)
污泥生物炭制备过程中氮磷钾及重金属的迁移行为	李智伟	王兴栋	林景江	陆江银
废旧手机电路板酸性金属脲浸金过程动力学	赵 新	张承龙	王景伟	苑文仪(1400)
.....	白 静	白建峰	戴 珏	罗新云
.....	邓明强	王鹏程	赵 新	张承龙
大高差溜槽粉尘颗粒扩散运动规律数值模拟	贾 兰	宋子岭	赵 光(1406)	
基于复合球团的以生物质焦油为还原剂的铬渣无害化处理	孙鹏鹏	罗思义	卜庆洁	马 晨
2 种浸取程序下炉渣重金属浸出特性	吴丽萍	苟楚璇	李庆波	文科军
餐厨垃圾高温产甲烷的高盐度抑制及恢复性研究	夏旦凌	金 满	徐期勇(1426)	
综合利用镁合金废料制氢及氢氧化镁	厉雄峰	沈林叶	刘宗健	黄新文(1432)
兰炭焦粉的石墨化探索性研究	党晓娥	唐 晨	吕 军	柯文帅(1438)
不锈钢尾渣重金属回收工业实验与应用	李葆生(1445)	付兴民	徐国欢	李子君
不干胶废弃物热解与燃烧动力学特性	任善普	杨 迪	贾晋炜	鲁明元
剩余污泥混合对絮凝污泥厌氧消化的强化	胡小兵	赵 鑫	叶 星	钟梅英(1456)
CNTS 接枝改性废 EP/PVC 复合材料的研究	郑 刚	陆书玉	罗丽娟	宋鹏程(1463)
牛粪和玉米秸秆厌氧消化产甲烷潜力及动力学	孙志岩	张君枝	刘翌晨	吴 岩
黄粉虫壳聚糖处理养殖废水	熊晓莉	陈小蓉	邵承斌	李 宁(1475)
垃圾焚烧灰渣浸出液中盐分对 ICP 测定铅和镉的影响	周 斌	易新建	李 静	邵煜锟
.....	王欢欢	庞丹丹	郑 尧	屈茂会
MgO-ZrO ₂ 固体碱催化废弃物油制备生物柴油	柯瑶瑶	冀晓东	李亚伟	赵 宁
合成条件对粉煤灰合成沸石除磷特性的影响				

土 壤 污 染 防 治

典型农业活动区土壤重金属污染特征及生态风险评价	虞敏达	张 慧	何小松	张 媛
.....	刘雨佳	赵 远	梁玉婷	朱志宝
油田污染土壤中石油烃类微生物及其降解基因的分布				

环 境 生 物 技 术

康定柳对铈胁迫的生理生化响应及富集能力	朱 靖	陈 珂	张 渊	杨 叶(1515)
一株 DBP 高效降解菌的分离、鉴定与降解性能	高俊贤	刘 琦	连梓竹	杨统一(1521)
响应面法优化石油降解菌性能的研究	牛志睿	山宝琴	刘 羽	李卓珏
4 株聚丙烯酰胺降解菌的深度驯化及联合降解作用	孙晓君	于 凯	魏金枝	冯玉杰(1533)
Pseudomonas S2-3 菌株对 Cr(VI) 的耐受性及去除	洪 霞	张馨荃	严君华	夏 琦
.....				

环 境 监 测 技 术

太湖贡湖湾主要河流表层沉积物重金属污染及其生态风险评价	邹 华	王靖国	朱 荣	武旭跃(1546)
GIS 在 B-IBI 法评价鄱阳湖水生态系统健康性中的应用	陆健刚	钟 燮	吴海真	王 华(1553)
基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价	杨学福	王 蕾	关建玲	段晋明(1560)
基于 IGA-BP 网络的水质预测方法			张旭东	高茂庭(1566)

相 关 研 究

小槽式集热系统热性能测试和理论研究	王显龙	廉永旺	李华山	姚 远
.....				

不锈钢尾渣重金属回收工业实验与应用

李葆生

(洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 洛阳 471039)

摘要 为降低堆存不锈钢尾渣重金属浸出危害和生产钢渣肥料,进行了重金属湿法回收工业实验。实验结果表明,金属品位和综合回收率可达到86%、95%;Cr、Ni平均回收率可达到90%。将研究成果运用到山西太钢不锈钢尾渣处理工程实践上,取得了良好的效果。通过对工艺流程和调试过程的介绍,从重金属矿物相组成和分选机理入手,分析了工艺特点和影响因素,为工艺推广应用提供了参考。

关键词 不锈钢尾渣 重金属 湿法回收

中图分类号 X757 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)03-1445-05

Industrial experiment and application on heavy metal recovery of stainless steel tail slag

Li Baosheng

(Luoyang Mining Machinery Engineering Design Institute Co. Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract Industrial experiments on the hydrometallurgical recovery of heavy metals were carried out to identify ways to prevent heavy metal leaching from stainless steel tail slag and provide a scientific basis for producing steel slag fertilizers. The results showed that the comprehensive recovery percentages for metals could reach up to 86% to 95% with the process described in this paper. The average recovery percentages for Cr and Ni were about 90%. The process was applied to treat stainless steel tail slag at the Taiyuan Stainless Co. Ltd., successfully. Based on mineralogical phase components of heavy metals and separation mechanisms, technological characteristics and influencing factors of the process were analyzed, and techniques for debugging are described herein. All the results should provide a good reference for widespread applications of the process.

Key words stainless steel tail slag; heavy metals; hydrometallurgical recovery

据统计,2011年我国不锈钢产量超过1 200万t,钢渣总量约320万t^[1]。目前国内不锈钢渣利用多限于原渣金属回收,尾渣则大量抛弃。若不进行稳态化处理,其中的Cr化合物可溶出强毒性Cr⁶⁺,危害环境和人体安全^[2-3]。山西太钢不锈钢股份有限公司(以下简称太钢)年产不锈钢达300万t,渣约90万t。钢渣经破碎干选后渣钢回用,剩余0~10mm尾渣约80万t堆存仍未被利用,对其进行深度处理不仅会取得明显的经济和社会效益,而且具有很强的示范作用。

尾渣具有多孔、表面积大、吸附性好等特点,且含有大量对农作物和土壤有益的钙、镁、硅等元素,可大规模应用于农业和土壤改良^[4],但利用的前提是施用后土壤重金属含量要符合《国家土地污染技术规定标准值》,这就要求尾渣中重金属含量尽可能低。

根据美国不锈钢渣肥料生产经验,当渣中金属含量在1‰以下时,可浸出有毒重金属绝大部分得

以去除,能够达到美国钢渣农业应用标准。由于不锈钢尾渣金属含量很低,要实现上述目标金属去除率应达到95%左右。另外,要实现规模化商业运营,回收的金属品位应在80%以上。要求同时达到如此高的回收率和金属品位难度很大,目前国内未见应用报道。

1 国内技术现状

国内不锈钢渣金属回收分为湿法和干法。湿法以2004年宝钢集团有限公司电炉渣、精炼炉渣处理线为代表,主要是钢渣破碎后用跳汰工艺选出7mm以上渣钢^[5](品位≥85%)。干法以2008年太钢电炉渣处理线为代表,应用金属感应分离器和强磁选

基金项目:山西省重点工程项目(晋政办发[2012]10号)

收稿日期:2014-01-13; 修订日期:2015-09-13

作者简介:李葆生(1973—),男,工程师,长期从事固体废物处理工程设计与调试。E-mail:lbs073@163.com

机对破碎后块状金属物(粒径 $\geq 15\text{ mm}$)进行回收。

上述方法主要针对渣中易单体解离的片、块状单质金属,回收达到商业品位的金属物粒级在 3 mm 以上。对于呈细网脉状嵌布态存在的毫米级以下金属微粒,回收率和品位很不理想。

2 钢渣特性

太钢不锈钢生产分别采用了“电炉-转炉”和“初炼炉-顶底复吹转炉-真空精炼炉”工艺^[6]。不同工艺、工序产生的不锈钢渣性质各异。从物理形态来看,自然冷却电炉渣一般为深色块状,局部可见金属镶嵌分布。而精炼炉渣、转炉渣通常呈灰白色,金属含量少,冷却过程易发生粉化最终呈颗粒状或粉状。不锈钢渣主要矿物组成为硅酸二钙、部分为铬尖晶石、钙铬石、铁酸钙、金属铁铬镍等,其中钙铬石具有强毒性^[7]。

太钢堆存的不锈钢渣主要为电炉渣、精炼炉渣、转炉渣经干选后的混合尾渣,80%以上粒度小于 5 mm 。尾渣化学成分如下:CaO 为 48%、SiO₂ 为 24%、Al₂O₃ 为 13%、MgO 为 5.4%、NiO 为 0.38%、Cr₂O₃ 为 1.2%、TFe 为 2.4%。

3 工业实验

为筹建 100 万 t/a 尾渣处理线,在充分技术调研的基础上,2011 年太钢将不锈钢尾渣和一定比例的原渣运至美国某生产线,进行了“两段研磨两级分选”流程工业实验,实验历时 3 个月,取得一批有实用价值的数

据。全尾渣工况下,给料、磨矿产物筛析数据见表 1、表 2。各单元工艺金属回收率、品位实验数据见表 3。结合拟定的小时设计处理量,确定了一段研磨采用 $\phi 3.6\text{ m}\times 5.4\text{ m}$ 棒磨机,二段研磨采用 $\phi 3.2\text{ m}\times 5.4\text{ m}$ 球磨机。

将第 2 段研磨除铁后的尾渣经脱水和自然干燥后缩分,配置成不同浓度的试样,进行了多组自然沉降试验。典型沉降曲线见图 1。根据处理量和沉降数据(集合沉降速度 4.7 mm/min)确定浓缩机规格为 $\phi 30\text{ m}$ 。

回收金属后尾渣的过滤脱水采用 4 因素 3 水平正交分析实验法,测定了滤布单位质量(品种)、过滤机转速、真空度、进料浓度对滤饼产量、含水率的影响。设计采用的数据见表 4。根据过滤渣浆量和单位面积实验产量,选定了 2 台过滤面积分别为 96 m^2 ,

表 1 进料尾渣粒度分析

Table 1 Grain size analysis of input tail slag				
网 目	孔径 (mm)	分计筛余 (%)	筛上累积 (%)	筛下累积 (%)
4	4.75	7.48	21.43	78.57
8	2.36	2.76	24.18	75.57
16	1.18	2.98	27.16	72.84
20	0.85	1.61	28.77	71.23
30	0.6	1.93	30.71	69.29
50	0.3	6.40	37.11	62.89
100	0.15	10.04	47.14	52.86
200	0.075	16.60	63.75	36.25
筛底	0	36.25	100	0

表 2 球磨出料粒度分析

Table 2 Grain size analysis of ball mill outlet				
网目	孔径 (mm)	分计筛余 (%)	筛上累积 (%)	筛下累积 (%)
30	0.6	0	0	100
50	0.3	0.65	0.75	99.25
100	0.15	7.85	8.32	91.68
200	0.075	20.41	28.73	71.27
筛底	0	71.27	100	0

表 3 分选工艺指标

Table 3 Separation technology index (%)			
产品名称	产 率	品 位	金属回收率
1 级螺旋分选精矿(渣)	6.85	37.12	84.54
2 级螺旋分选精矿(渣)	2.87	88.43	84.27
1 级磁选中矿(渣)	4.71	15.40	24.18
2 级磁选中矿(渣)	2.03	32.06	21.33
3 级螺旋分选中矿(渣)	0.91	38.78	11.63

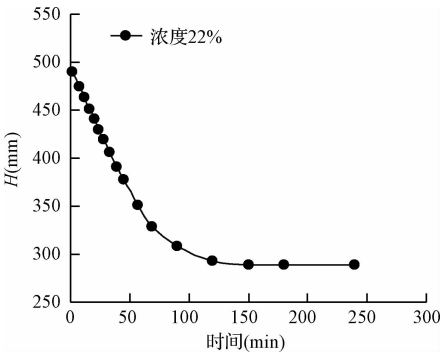


图 1 矿浆沉降曲线

Fig. 1 Subsidence curve of ore pulp

直径为 2.8 m 的圆盘真空过滤机。同时,还确定了过滤机转速范围、过滤区和干燥区分配比例、反吹卸料高度等参数。

综合上述工业实验数据,进行了全流程物料和水平衡计算,为实际工程应用提供了设计依据。

(2)国内湿法技术主要沿用磁铁矿选矿工艺,流程设计上遵循“阶段磨矿、阶段选别”原则,低品位难选矿物随流程逐段抛弃。这种设计思路对含铁30%左右的自然矿物是适宜的。但不锈钢尾渣金属含量仅2%~3%,属于极贫“人工矿”,贵金属Ni、Cr含量更低,回收率降低意味着单位运行成本大幅上升。这也是国内湿法工艺不把低金属含量的精炼炉、转炉粉渣作为主要处理对象的原因。该技术将物料全部入磨,主产品在二次分级机一次选出,虽然磨机规格有所增加,但工艺流程却大大缩短,为最大限度地提高回收率创造了条件。

(3)虽然与国内“两段磨”选矿工艺形式相同,但第一段磨的作用则有显著差别。选矿一段磨主要是为了降低二段磨工作负荷进行阶段选别而设置。对于既定规格的一段磨在保证产能的情况下力求降低出料粒度。但该项目中一段棒磨主要在处理原渣、混合渣时出力较大。在入料全部是尾渣的工况下,由于主要采用的是重选,过细的金属化合物难以在预定时间和浓度下迅速沉降而随溢流流失,因此对棒磨机的出料粒度必须有所控制,不能过小。

(4)选别工艺设计上,国内湿法技术主要采用跳汰和摇床工艺。该项目放弃了这一传统设计,采用了主选工艺上很少使用的螺旋分级机。尾渣中金属物主要呈球粒状嵌布,少数呈斑点状解理充填,粒度一般介于0.01~0.50 mm,少数粒度为0.60~0.90 mm^[8]。跳汰机作为中粒重选设备,实践中分选粒度下限在1 mm左右效果较好^[9],对于微米级粒子分选效果很差。摇床分选粒级范围虽然大,但单台处理能力太低。而沉没式螺旋分级机在分级粒度范围上恰好适应了尾渣中金属物的嵌布特点,单台处理能力也能满足设计要求。应用时要根据工业试验数据对螺旋叶片、中心轴、槽体等结构参数进行针对性设计。

(5)用于生产硅肥的尾渣对重金属含量要求严格。过滤滤饼浸出实验测得可浸出铬含量为0.099 mg/L,未检出浸出Cr⁶⁺值,小于美国废弃物可浸出铬标准5 mg/L,更小于中国标准值^[10-11]。根据X射线衍射图谱^[12],渣中Gr、Ni主要存在形式是MgCr₂O₄、(Cr, Al)₂O₃、Gr₂O₃、Ni-Cr-Fe金属,其中Gr₂O₃不溶于水,铬铁合金(Ni-Cr-Fe)具有强磁性,其余具有弱磁性。该项目以比重差、磁性为去除机理的分段选别工艺很好地切合了渣中重金属的物相特征。

磁选工艺的主要目的不是回收而是尽可能降低渣中金属含量。它对磁场强度和梯度要求很高^[13]。

设计采用了两级串联逆流式磁选机,距离筒体表面50 mm处磁场强度为95 mT。回收的金属物品位虽然只能达到40%左右,市场价值有限。但它却是肥料生产控制金属含量不超标的保证工序。这部分回收物仍可通过浮选工艺进一步提纯后销售。

6 运行问题分析

2段研磨分选工艺在设计和调试运行过程中,应特别重视不锈钢渣一些独特的物理化学性质对构筑物、设备和生产工艺的影响,处理不当会严重影响生产稳定运行。

(1)重金属污染预防问题。Cr³⁺在有CaO存在的室温条件下有被氧化成Cr⁶⁺的可能^[14-15],速率跟物料粒度、溶液pH值、时间密切相关^[16]。工程设计时,浓缩池、工艺水池、排水沟要采取多种防水措施。如:内壁涂刷多层聚合物防水砂浆、提高混凝土防渗等级、增加厚度、外壁采用双层防水毡等。车间、料场地面也要采取耐老化防渗膜。生产线在钢渣筛分过程中,还备有固态还原剂F₂SO₄,不定期地以2%的比例加入原料中,促使Cr⁶⁺还原成Cr³⁺。项目自带料运行起,每个月都要在距生产线半径100 m处监测地下水重金属含量。

(2)物料粘度的影响。不锈钢尾渣基本呈粉末状,新渣含水率10%~15%,自然堆积角在70°以上,流动性很差。再加上其固有的碱性,生产时很容易造成棒磨机进口堵塞、设备和管道结垢、皮带机大量粘料,冬季严重时可导致停产。在磨机进口导料、皮带机刮料、过滤机卸料等装置设计上要有足够的应对措施。

(3)水平衡控制问题。系统长期运行,物料中的CaO会使循环水pH值大幅升高。经检测带料运行1个月左右,浓缩池溢流水pH已达14。水系统一旦失去平衡,排放的废水将造成严重二次污染。如果建设大规模废水处理系统,会使运行成本急剧升高。由于运输原因,钢渣处理设施一般建在钢厂附近,不可能建设拥有巨大水平衡调节能力的尾矿坝。这就要求设计尽可能对生产用水进行清、浊分流循环使用,并采用节水型设备降低新水用量。试生产中将其中一台圆盘真空过滤机改为更为节水的陶瓷真空过滤机,大大降低了水平衡的控制难度,提高了系统运转率。实践证明,湿法处理完全可以实现废水零排放。

(4)浓缩机溢流浓度问题。项目为了最大限度地减少新水用量,回收金属物冲洗、磁选机卸料均采

用浓缩机溢流作为水源。这种方式要求溢流水浊度尽量低。但运行过程中处于临界沉降状态的悬浮颗粒数量不断循环累积,严重时浓缩池会失去澄清界面,溢流水浊度迅速恶化。大量灰分随洗渣水混入回收金属中,造成品位大幅下降。此时需要在浓缩池中加入碱性高分子絮凝剂,添加时要严格控制絮凝剂用量以防浆料过快沉淀造成严重的浓缩机“压耙”事故。

7 结 论

(1) 两段研磨分选流程在工业试验的基础上,依据不锈钢渣中不同重金属矿物相的嵌布粒度和嵌布特征,充分发挥了棒磨机处理能力大,过粉碎渣粒少的优点实现了单质金属颗粒的解离。利用球磨机研磨产品细的优势实现了微细金属氧化物的解离。根据不同重金属矿物相磁性、密度物性差,分别采用磁选机和螺旋分级机有针对性的选别,最大限度地保证了重金属的回收率和品位。工业生产主产品金属2的品位稳定在86%以上,金属综合回收率达到了95%。生产测定Gr、Ni综合回收率为87%~93%。

(2) 该工艺的应用可以兼顾社会效益和经济效益,为尾渣进一步大规模农业利用创造了条件,产业化推广应用价值很大。实际应用时要注意物料和水系统平衡,防止产生二次废水污染。

参 考 文 献

- [1] 李小明, 李文锋, 王尚杰, 等. 不锈钢渣资源化研究现状. 湿法冶金, **2012**, 31(1): 5-8
Li Xiaoming, Li Wenfeng, Wang Shangjie, et al. Research status on comprehensive Utilization of stainless steel slag. Hydrometallurgy of China, **2012**, 31(1): 5-8 (in Chinese)
- [2] Bulut U., Ozverdi A., Erdem M. Leaching behavior of pollutants in ferrochrome arc furnace dust and its stabilization/solidification using ferrous sulphate and Portland cement. Journal of Hazardous Materials, **2009**, 162(2-3): 893-898
- [3] Fällman A. M. Leaching of chromium and barium from steel slag in laboratory and field tests: A solubility controlled process? Waste Management, **2000**, 20(2-3): 149-154
- [4] 卓琳, 李华, 史永林, 等. 钢渣资源的农业利用研究. 科技情报开发与经济, **2011**, 21(33): 149-150
Zhuo Lin, Li Hua, Shi Yonglin, et al. Study on the utilization of steel slag resources in agriculture. Sci-Tech Information Development & Economy, **2011**, 21(33): 149-150 (in Chinese)
- [5] 甄常亮, 那贤昭, 齐渊洪, 等. 不锈钢渣毒性浸出特征及无害化处置现状. 钢铁研究学报, **2012**, 24(10): 1-5
Zhen Changliang, Na Xianzhao, Qi Yuanhong, et al. Toxicity leaching characteristic and harmless disposal of stainless steel slag. Journal of Iron and Steel Research, **2012**, 24(10): 1-5 (in Chinese)
- [6] 王一德. 太钢不锈钢的现状与发展. 中国有色金属学报, **2004**, 14(S1): 72-81
Wang Yide. Current status and development of stainless steel in Taiyuan Iron and Steel (Group) Co. Ltd. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **2004**, 14(S1): 72-81 (in Chinese)
- [7] 韩伟. 不锈钢渣湿式处理工艺及在宝钢的应用. 宝钢技术, **2010**, 18(3): 30-33
Han Wei. Hydro-processing of stainless steel slag and its application in Baosteel. Baosteel Technology, **2010**, 18(3): 30-33 (in Chinese)
- [8] 李光辉, 郭斌, 张元波, 等. 转炉钢渣工艺矿物学及其综合利用技术. 中南大学学报, **2010**, 41(6): 2065-2071
Li Guanghui, Wu Bin, Zhang Yuanbo, et al. Mineralogical characteristics and comprehensive utilization of converter steel slag. Journal of Central South University, **2010**, 41(6): 2065-2071 (in Chinese)
- [9] 《选矿设计手册》编委会. 选矿设计手册. 北京: 冶金工业出版社, **1988**: 180-181
- [10] Dusing D. C., Bishop P. L., Keener T. C. Effect of redox potential on leaching from stabilized/solidified waste materials. Journal of the Air & Waste Management Association, **1992**, 42(1): 56-62
- [11] 国家环境保护总局. GB 5085.7-2007 危险废物鉴别标准 通则. 北京: 中国环境科学出版社, **2007**
- [12] 陈子宏, 马国军, 肖海明, 等. 不锈钢冶炼电炉渣结构性质及浸出行为研究. 武汉科技大学学报, **2009**, 32(5): 466-470
Chen Zihong, Ma Guojun, Xiao Haiming, et al. Microstructural properties and leaching behavior of the stainless steel EAF slag. Journal of Wuhan University of Science and Technology, **2009**, 32(5): 466-470 (in Chinese)
- [13] 罗立群, 王韬, 刘林法. 铁矿石提铁降杂技术发展动态. 现代矿业, **2009**, 25(10): 1-6
Luo Liqun, Wang Tao, Liu Linfa. Developments of iron concentrate upgrading and impurity reducing. Modern Mining, **2009**, 25(10): 1-6 (in Chinese)
- [14] Pillay K., Von Blottniz H., Petersen J. Ageing of chromium(III)-bearing slag and its relation to the atmospheric oxidation of solid chromium(III)-oxide in the presence of calcium oxide. Chemosphere, **2003**, 52(10): 1771-1799
- [15] Ma Guojun. Gr(VI)-containing electric furnace dust and filter cake: Characteristics, formation, leachability and stabilization. Pretoria: Doctor Dissertation of University of Pretoria, **2005**: 25-98
- [16] 魏代修, 徐安军, 贺东风, 等. 电炉渣资源利用特性及铬的浸出特性. 钢铁, **2012**, 47(10): 92-96
Wei Daixiu, Xu Anjun, He Dongfeng, et al. Beneficial reuse of EAF slag and its leaching behavior of Cr. Iron and Steel, **2012**, 47(10): 92-96 (in Chinese)